

УДК 621.391.8

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-50-57

МОДЕЛЬ СРЕДЫ УСТАНОВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
С НЕНАДЕЖНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ*О. В. Меркушев*, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*И. З. Климов*, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Представлен метод прогнозируемой оценки надежности физических каналов и модель надежности среды установления соединения в распределенной системе передачи данных на примере системы радиосвязи в ДКМ-диапазоне частот. Из-за особенностей распространения сигналов, флуктуации параметров передающей среды, природных и искусственных явлений, наличия «зон молчания», сложной помеховой обстановки системы связи в ДКМ-диапазоне отличаются нестационарностью физических каналов и сложностью реализации информационного обмена. При взаимодействии узлов по типу «каждый с каждым» формируется распределенная система передачи данных с динамической многополюсной топологией. Доставка сообщений удаленным узлам выполняется средствами маршрутизации по основному и резервным маршрутам. Поэтому актуальными являются вопросы разработки методов формирования маршрутов доставки сообщений по критерию надежности, включающие в себя сбор и обработку статистических данных качества принимаемых сигналов; определение закономерностей изменения уровней помех и периодов их влияния; прогнозирование состояния физических каналов и адаптивное управление их использованием; формирование линий связи как систем обмена данными с надежностью, превышающей надежность физических каналов.

Для решения задачи формирования линий связи определен метод оценки надежности физических каналов в условиях их нестационарности. В соответствии с принятыми методами доступа к физической среде на этапе установления соединения определен метод прогнозирования оценки надежности физических каналов на заданный период взаимодействия соседних узлов. В соответствии с принятой моделью управления физическими каналами разработан метод оценки надежности среды установления соединения соседних узлов.

Ключевые слова: канал, надежность, модель, физическая среда, прогнозирование, моделирование, узел.

Введение

Основу распределенной системы передачи данных в ДКМ-диапазоне частот составляют физические каналы, отличающиеся большой зашумленностью и нестационарностью уровней сигналов и помех [1–3]. В условиях нестационарности физических каналов задача доставки сообщений конечным абонентам решается средствами маршрутизации данных [4–6] при условии формирования маршрутов по критерию надежности. Элементами маршрутов доставки сообщений являются линии связи, основу которых составляют физические каналы. Тогда актуальными являются вопросы разработки методов формирования маршрутов доставки сообщений по критерию надежности, включающие в себя сбор и обработку статистических данных качества принимаемых сигналов; прогнозирование состояния физических каналов и адаптивное управление их использованием; формирование линий связи как систем обмена данными с надежностью, превышающей надежность физических каналов, где надежность понимается как свойство технического объекта сохранять свои параметры в определенных пределах при заданных условиях.

Цель исследования – определить методы прогнозирования и оценки надежности физиче-

ских каналов в условиях их нестационарности для формирования линий связи.

Модель надежности физического канала

В работах по исследованию помехоустойчивости физических каналов указано, что распределение уровней сигналов и помех описывается преимущественно нормальным законом. Оценка качества физического канала выполняется на основе вероятности ошибки элемента сигнала ($p_{\text{ош}}$) на фоне нормальной стационарной помехи, выраженной как функция отношения средней энергии сигнала к спектральной плотности помехи h_0^2 на входе приемного устройства. В связи с нестационарностью физических каналов использование только $p_{\text{ош}}$ для оценки надежности недостаточно. Тогда для оценки надежности вводится условие, что вероятность ошибки элемента сигнала $p_{\text{ош}}$ меньше допустимой $p_{\text{ош, доп}}$ при известной статистике сигналов и помех на локальных интервалах квазистационарности в заданном физическом канале:

$$p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош, доп}} \cdot \quad (1)$$

Сбор статистических данных выполняется узлами в ходе обмена кадрами управления. Кроме кадров управления узлы широкоэвентельно рассылают кадры уведомления *Hello* с периодом, равным T_{Hello} , что позволяет получать

оценки качества сигналов, принимаемых от соседних узлов, с заданным интервалом времени T_{Hello} . Для каждого принятого кадра узел определяет $p_{оши}$.

Оценка надежности принимаемых от соседних узлов дискретных сообщений ($P_{НПДСi}$) выполняется каждым узлом в каналах $E_{УС}$ в течение периода обновления отношений соседства $T_{ООС}$, используя условие (1). Для определения $P_{НПДС}$ применяется метод, приведенный в источнике [8]:

$$\begin{aligned} P_{НПДС}(p_{оши} \leq p_{оши, доп}) &= \\ &= \int_0^{p_{оши, доп}} w(p_{оши}) dp_{оши} = P_{НПДС}(z > z_{доп}) = \\ &= \int_{z_{доп}}^{\infty} w(z) dz = F\left(\frac{\bar{z} - z_{доп}}{\sigma_z}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где w – плотность распределения вероятностей случайной величины; $z = 10 \lg h^2$ – отношение уровней сигнала и помехи; \bar{z} – среднее отношение уровней сигнала и помехи, которое вычисляется на интервале $T_{ООС}$ методом скользящего

окна; $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ – интегральная

функция вероятности ошибки; $x = \frac{\bar{z} - z_{доп}}{\sigma_z \sqrt{2}}$.

В результате для каждого физического канала за период $T_{ООС}$ формируется множество оценок $\{P_{НПДСi}\}$ надежности прима дискретных сообщений, передаваемых заданным соседним узлом в заданном физическом канале $e_{УС.i}$. Последовательность $\{P_{НПДСi}\}$ не позволяет оценить надежности канала на интервале времени $[t, t + T_{ООС}]$, что необходимо для формирования таблиц маршрутизации. Для этого требуется определить прогнозируемую оценку надежности физических каналов.

Для последовательностей оценок качества принимаемых сигналов в отдельном физическом канале наиболее подходящей является модель кусочно-нормальной последовательности, у которой существенные изменения качества происходят в случайные моменты t_i и t_{i+1} . В промежутках между ними оценка качества канала является нормальной стационарной с постоянными статистическими параметрами. Длительности периодов квазистационарности $T_{КС}$ распределяются в большинстве случаев по экспоненциальному закону. Свойства физической среды исследуемой системы изменяются медленно, что дает возможность применять методы прогнозирования стационарных процессов к

квазистационарным. Следовательно, прогнозируемые оценки надежности $e_{УСi}$ на период обновления отношений соседства $[t_i, t_i + T_{ООС}]$, где $T_{ООС} < T_{КС}$ являются стационарными.

Для определения прогнозируемой оценки надежности $e_{УСi}$ на период $[t, t + T_{ООС}]$ к полученной последовательности $\{P_{НПДСi}\}$ выполняется экстраполяция полиномом $p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1}$ с наименьшей среднеквадратичной погрешностью и смещением метода скользящего окна [9]. Найденные коэффициенты полинома позволяют выполнить расчет значения зависимой переменной $\{P_{ИСКi}\}$ однофакторной регрессионной полиномиальной модели в заданных точках относительно исходной последовательности $\{P_{НПДСi}\}$. Полученное значение $P_{ИСКi}$ является прогнозируемой вероятностью исправного состояния канала на период $[t, t + T_{ООС}]$. $\{P_{ИСКi}\}$ позволяют оценить надежность приема текущим узлом дискретных сообщений, передаваемых заданным соседним узлом на физическом канале $e_{УС.i} \in E_{УС}$ с заданной достоверностью. Используя $P_{ИСКi}$ и интервал $T_{ООС}$, определяют длительности периодов состояний исправного $T_{ИСК}$ и восстановления $T_{ВК}$ заданного канала:

$$T_{ИСК} = T_{ДОК} * \bar{P}_{ИСК}; T_{ВК} = T_{ДОК} - T_{ИСК}. \quad (3)$$

Прогнозируемые стационарные оценки интенсивности отказов и восстановлений физического канала на период $[t, t + T_{ООС}]$ есть отношения:

$$\lambda_{e_{УСi}} = \frac{1}{T_{ИСК}}; \mu_{e_{УСi}} = \frac{1}{T_{ВК}}. \quad (4)$$

Имитационное моделирование надежности физического канала

Имитационное моделирование выполнялось на основе разработанной модели системы передачи данных «Эстафета», действующей в среде моделирования дискретных событий «OMNet++» [10, 11]. В имитационной модели реализована нестационарность частотных каналов, выраженная в случайных изменениях мощности принимаемых сигналов в соответствии с нормальным законом распределения.

Оценка качества принимаемого сигнала выполняется на основе отношения сигнал/помеха (z), значения которого определяются узлами в ходе приема кадров данных от заданного соседнего узла. Оценка качества физического канала выполняется по величине вероятности ошибки

элемента сигнала $p_{\text{ош}}(z)$ на фоне нормальной стационарной помехи. Отказ канала есть отсутствие приема, ожидаемого на заданном интервале времени, дискретного сообщения или его прием с надежностью ниже пороговой, которая определяется неравенством (1). При выполнении моделирования было принято условие о допустимой величине вероятности ошибки элемента сигнала равной $p_{\text{ош.доп}} = 10^{-3}$.

Для каждой пары соседних узлов $\{k, l\} \in N$ в течение периода $T_{\text{ооc}}^{k,l} \approx 224$ с формируются (об-

новляются) множества оценок качества физических каналов $P_{\text{ош}j} \{p_{\text{ош}ij}\}$, где $j=1, \dots, |E_{\text{yc}}|$; $i=1, 2, \dots$; $p_{\text{ош}ij}$ – вероятность ошибки элемента сигнала за время приема дискретного сообщения (кадра) длительностью $T_{\text{кадрсyc}}$. На рис. 1 показаны изменения вероятности ошибки элемента сигнала $p_{\text{ош}}$ (зависимость 1), определенные узлом n_1 при получении сигналов от узла n_0 в физическом канале $e_{\text{yc}1}$. Линией 2 показан заданный уровень допустимой вероятности ошибки элемента сигнала $p_{\text{ош.доп}}$.

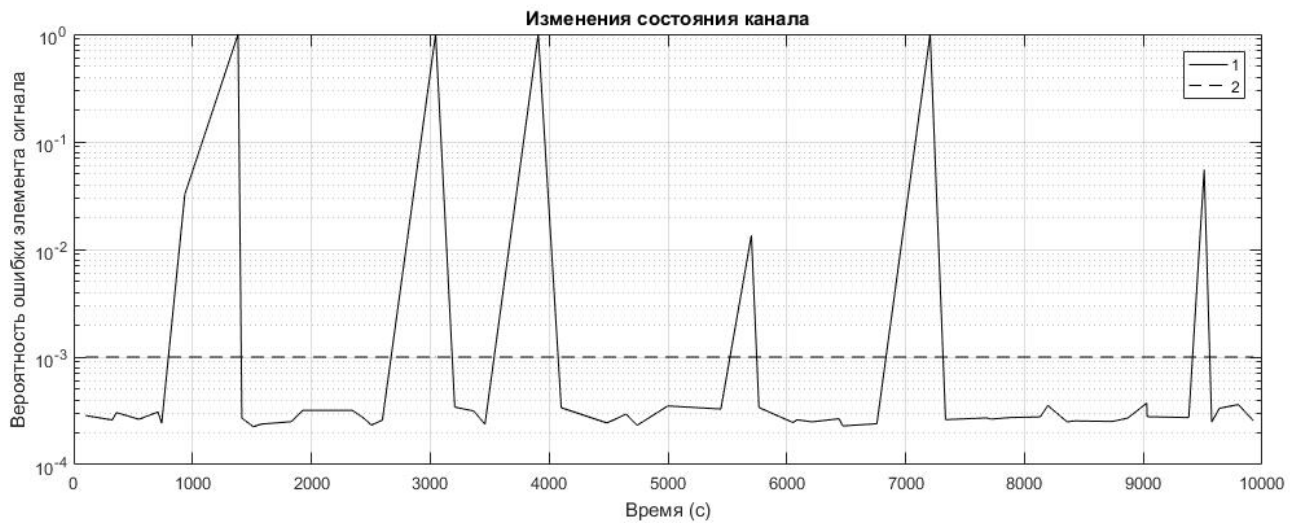


Рис. 1. Вероятность ошибки элемента сигнала $p_{\text{ош}}$: 1 – определенная узлом n_1 при получении сигналов от узла n_0 в физическом канале $e_{\text{yc}1}$; 2 – допустимая вероятность ошибки элемента сигнала $p_{\text{ош.доп}}$

Влияние сосредоточенных и флуктуационных помех на качество принимаемого сигнала отражено в изменениях значения $p_{\text{ош}}$. На основе полученных множеств вероятностей ошибок элементов сигналов $P_{\text{ош}j} \{p_{\text{ош}ij}\}$ с использованием выражения (2) формируются множества вероятностей надежного приема дискретных сообщений $\{P_{\text{нпдс}ij}\}$, где $j=1, \dots, |E_{\text{yc}}|$; $i=1, 2, \dots$

С целью получения прогнозируемой оценки надежности физического канала на период $[t, t + T_{\text{ооc}}]$ к полученной последовательности $\{P_{\text{нпдс}ij}\}$ был применен метод полиномиальной интерполяции с помощью аппроксимирующего полинома. Найденные коэффициенты полинома использовались для расчета значения зависимой переменной $\{P_{\text{иск}i}\}$ однофакторной регрессионной полиномиальной модели в заданных точ-

ках исходной последовательности $\{P_{\text{нпдс}i}\}$. В результате получена последовательность прогнозируемой вероятности исправного состояния канала $\{P_{\text{иск}i}\}$.

После применения метода оценки надежности каждый узел соседней пары $\{k, l\} \in N$ сформировал множество прогнозируемых оценок $\{P_{\text{иск}i}\}$ надежности физических каналов $e_{\text{yc}i} \in E_{\text{yc}}$. На рис. 2 показаны изменения вероятности надежного приема дискретного сообщения (кадра) $P_{\text{нпдс}}$ и вероятность исправного состояния канала $P_{\text{иск}}$, определенные узлом n_1 при получении кадров от узла n_0 в канале $e_{\text{yc}1} \in E_{\text{yc}}$ в ходе имитационного моделирования продолжительностью $e = 10^4$ с.

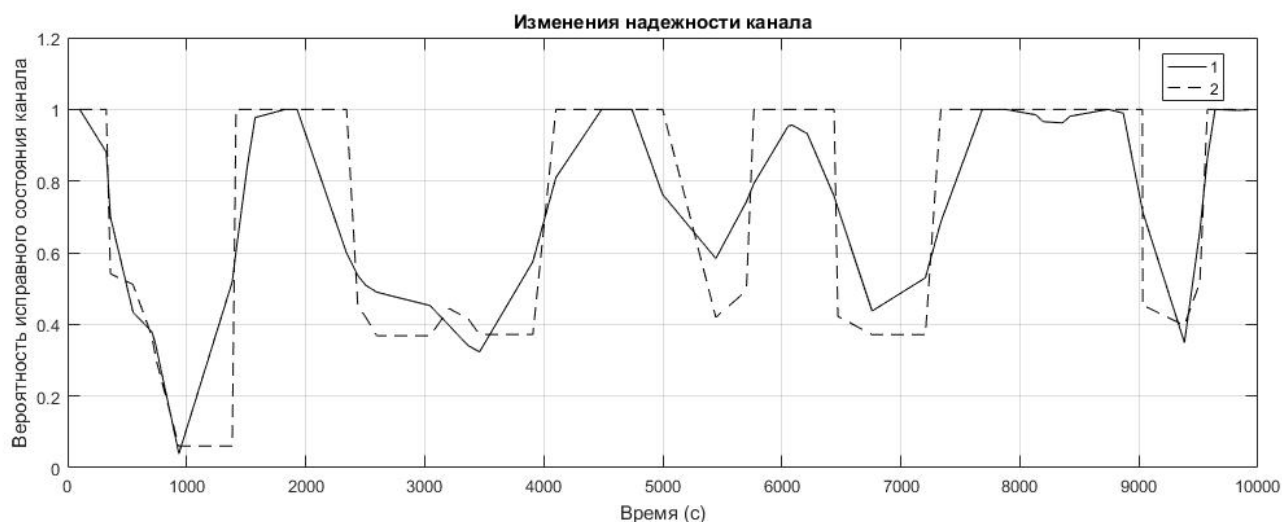


Рис. 2. Изменения вероятностей надежного приема дискретного сообщения $P_{\text{НПДС}}$ (1) и исправной работы канала $P_{\text{ИСК}}$ (2), определенные узлом n_1 при получении кадров от узла n_0 в физическом канале $e_{y_{c1}} \in E_{y_c}$

Используемый метод позволяет снизить влияние единичных выбросов $p_{\text{ош}}$ на общую оценку надежности приема кадров. Так, при единичных $p_{\text{ош}} = 1$ в результате действия сосредоточенных помех в момент времени $t = 1383$ с, значение $P_{\text{НПДС}} = 0,064$. В то же время при значительной разности отношения сигнал/помеха (z) и порогового значения $z_{\text{доп}}$ $P_{\text{НПДС}}$ стремится к 1. Так, в момент времени $t = 1383$ с, где $p_{\text{ош}} = 0,00025$, при $p_{\text{ош, доп}} = 0,001$ $P_{\text{НПДС}} = 1$.

Прогнозируемая на период $[t_i, t_i + T_{\text{оос}}]$ оценка надежности представлена последовательностью $\{P_{\text{ИСК}_i}\}$. Так, в интервале времени $t = \{740, 4, \dots, 935\}$ с при $P_{\text{НПДС}} = \{3,09e-4; 2,4e-4; 3,2e-2\}$ изменения прогнозируемой оценки составили $P_{\text{ИСК}} = \{0,378; 0,34; 0,039\}$.

Таким образом, разработанный метод оценки надежности канала позволяет определить величину готовности канала к передаче кадров с заданной достоверностью с учетом влияние сосредоточенных помех, создаваемых соседними узлами.

Модель надежности среды установления соединения

Взаимодействие узлов в среде установления соединения (СУС) выполняется в синхронном режиме с конкуренцией за среду. СУС образована каналами $e_{y_{c1}} \in E_{y_c}$. В соответствии с принятым методом доступа к среде [12] каналы $e_{y_{c1}}$ сменяют друг друга с периодом T_k . Время активности канала разделено на n равных слотов длительностью $T_{\text{слСУС}}$. Кадры управления, пере-

даваемые в СУС, имеют фиксированный формат и длительность передачи $T_{\text{кадрСУС}}$, где $T_{\text{кадрСУС}} < T_{\text{слСУС}}$ [13–15].

В течение T_k все узлы сети выполняют попытки взаимодействия, используя общий текущий физический канал $e_{y_{c1}} \in E_{y_c}$. Взаимодействие соседних узлов при индивидуальной адресации предусматривает отправку кадра квитанции на успешный прием кадра вызова в канале $e_{y_{c1}} \in E_{y_c}$. Следовательно, между любыми двумя узлами в активном канале поддерживается СУС, которая представляет активный в момент времени t канал $e_{y_{c1}} \in E_{y_c}$, связывающий входы узлов участников взаимодействия $\{k, l\}$. Отказ любого из участников соединения приводит к отказу СУС. Тогда СУС представляет собой восстанавливаемую нерезервированную систему с последовательным соединением элементов. Длительности периодов исправной работы и восстановления после отказов СУС распределены в соответствии с экспоненциальным законом.

Схема СУС показана на рис. 3.

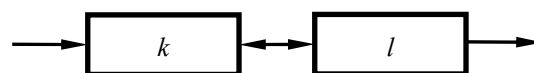


Рис. 3. Структурная схема среды установления соединения: k – узел-источник; l – узел следующего перехода

Элементы СУС не зависимы по отказам и не ограничены в восстановлении. Каждый узел k определяет надежность каждого физического канала $e_{y_{c1}} \in E_{y_c}$, связывающего его с каждым соседним узлом l , используя для этого прогно-

зируемую на период времени $[t, t + T_{\text{ооc}}]$ вероятность исправной работы канала $P_{\text{иск}i}^k$, интенсивности отказов $\lambda_{e_{\text{yc}i}}^k$ (4) и восстановлений $\mu_{e_{\text{yc}i}}^k$ (4). По истечении $T_{\text{ооc}}$ соседние узлы выполняют обмен полученными оценками надежности физических каналов. Тогда узел k для каждого физического канала $e_{\text{yc}i} \in E_{\text{yc}}$ в момент времени t получает оценки надежности приема кадров, передаваемых им соседнему узлу l . Это

позволяет текущему узлу k самостоятельно определить надежность выполнения процедуры индивидуального вызова соседнего с ним узла l в СУС_i , образованной физическим каналом $e_{\text{yc}i} \in E_{\text{yc}}$. Оценка надежности СУС_i является стационарной и прогнозируемой на период $[t, t + T_{\text{ооc}}]$.

Граф состояний полученной СУС представлен на рис. 4.

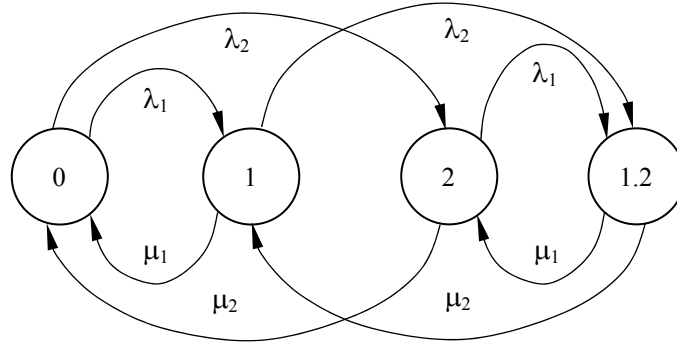


Рис. 4. Граф состояний СУС : λ_i, μ_i – интенсивности отказов и восстановлений i -го элемента

Функционирование СУС определено системой дифференциальных уравнений [16, 17]:

$$\begin{cases} p_0'(t) = -\sum_{j=0}^n \lambda_{0j} p_0(t) + \sum_{j=0}^n (\mu_{j0} p_j(t)), \\ p_i'(t) = -\sum_{j=0}^n (\mu_{ij} + \lambda_{ij}) p_i(t) + \sum_{j=0}^n \mu_{ji} p_j(t) + \sum_{j=0}^n \lambda_{ji} p_j(t), \end{cases} \quad (5)$$

где n – количество состояний системы.

Система уравнений решается при условии $p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_{1.2}(t) = 1$. Если в начальный момент времени ($t = 0$) система исправна, то $p_0(0) = 1$.

В результате решения (5) получено выражение стационарной вероятности нахождения системы в исправном состоянии:

$$p_0 = \frac{1}{\prod_i \rho_i + \sum_i \rho_i + 1}, \quad (6)$$

где p_0 есть коэффициент ее готовности, $F_{\text{свс}} \equiv p_0$; $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$.

Интенсивности возникновения отказов и восстановлений СУС :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{свс}} &= \sum_i \lambda_i; \\ \mu_{\text{свс}} &= \frac{F_{\text{свс}} \lambda_{\text{свс}}}{1 - F_{\text{свс}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученная в момент времени t оценка надежности СУС_i является прогнозируемой и стационарной в течение $[t, t + T_{\text{ооc}}]$, что необходимо для формирования таблиц маршрутизации. Для создания единой среды взаимодействия пространственно разнесенных узлов, имеющих различные условия приема сигналов, требуется объединение $\{\text{СУС}_i\}$ в систему, обеспечивающую обмен данными вне зависимости от качества отдельных физических каналов.

Имитационное моделирование надежности среды установления соединения

В имитационной модели СУС между двумя соседними узлами $\{k, l\}$ представляет собой восстанавливаемую нерезервированную систему с последовательным соединением элементов, где элементами системы являются принимающие тракты соседних узлов $\{k, l\}$, связанные физическим каналом $e_{\text{yc}i} \in E_{\text{yc}}$ [17, 18]. Оценка качества СУС в имитационной модели выполняется каждым узлом на основе полученных

интенсивностей отказов и восстановлений физических каналов $\{\lambda_{e_{yCi}}^k, \mu_{e_{yCi}}^k\}$.

В ходе имитационного моделирования была выполнена серия экспериментов, длительностью $T_{\text{exp}} = 10^4$ секунд каждый. В процессе поддержки отношений соседства каждый узел выполнял оценку надежности физических каналов при приеме кадров от соседних узлов, прогнозирование оценок надежности физических каналов на период T_{OOC} и определение надежности

$\{CUC_i\}$. Каждый узел при выполнении процедуры ООС с каждым соседним узлом на основе собранных за период T_{OOC} статистических данных выполнял расчет коэффициента готовности F_{CUC} (6) $\{CUC_i\}$ в каждом физическом канале $e_{yCi} \in E_{yC}$ для каждого отношения соседства.

На рис. 5 показаны изменения F_{CUC} , образованной физическим каналом $e_{yCi} \in E_{yC}$ между соседними узлами $\{n_0, n_1\}$.

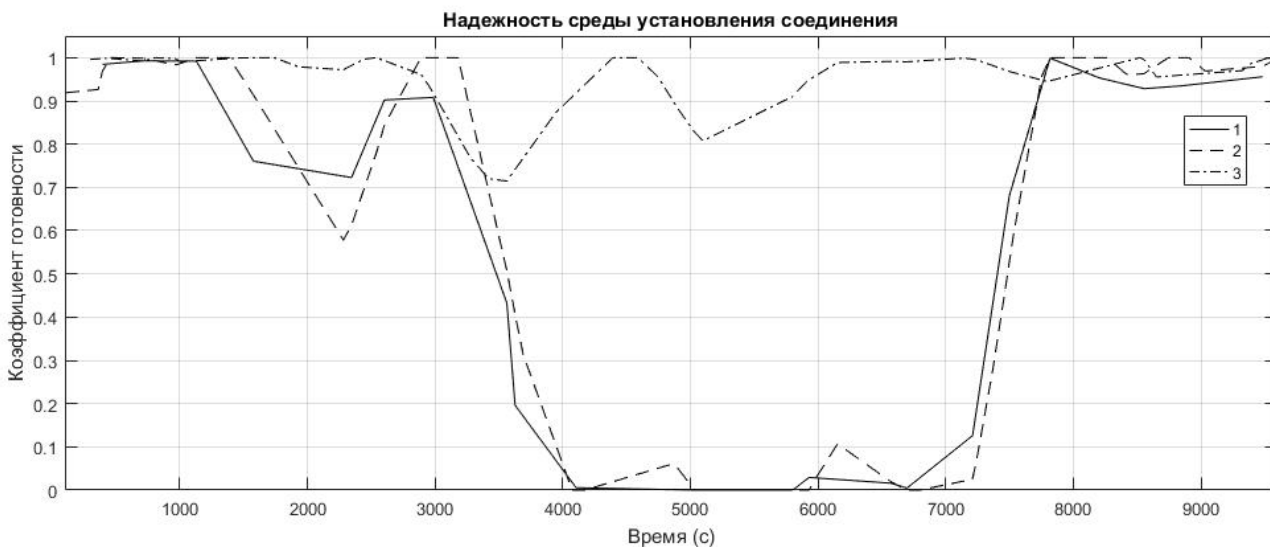


Рис. 5. Изменения коэффициента готовности среды установления соединения (1), надежности исправного состояния канала $e_{yC2} \in E_{yC}$, определенных узлами n_0 (2) и n_1 (3)

В силу того что СУС представляет собой систему с последовательным соединением элементов, надежность СУС не превышает надежность элементов, входящих в ее состав. Так, средние вероятности исправного состояния физического канала $e_{yC2} \in E_{yC}$, определенные соседними узлами $\{n_0, n_1\}$, при взаимном приеме кадров, соответственно, составили $\bar{P}_{\text{иск}2}^{01} = 0,644$; $\bar{P}_{\text{иск}2}^{10} = 0,947$ при среднеквадратических отклонениях $\sigma_2^{01} = 0,42$; $\sigma_2^{10} = 0,079$. При этом среднее значение коэффициента готовности СУС составило $\bar{F}_{CUC2} = 0,569$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_2 = 0,426$.

Анализ результатов

Отказом СУС считается потеря передаваемого кадра или его прием с достоверностью ниже допустимой. Отказ любого из элементов влечет за собой отказ всей системы и ее переход в состояние восстановления. Так, на интервале времени $t = \{4104,6 \dots 7371\}$ с узлом n_0 фиксировалось снижение качества сигнала, передаваемого

узлом n_1 , ниже заданного допустимого $p_{\text{ош, доп}} = 5e - 4$, что привело к переходу CUC_2^{01} в состояние восстановления. Использование отдельных физических каналов для организации взаимодействия узлов в единой физической среде не представляется возможным ввиду значительных различий в условиях приема пространственно разнесенных узлов, нестационарности физических каналов во времени и наличия длительных замираний сигналов.

Выводы

Полученный метод оценки надежности канала позволяет определить прогнозируемую надежность приема кадров узлами с заданной достоверностью на период T_{OOC} . Создана модель взаимодействия соседних узлов в заданном физическом канале при различных изменяемых состояниях физической среды. Получен метод оценки надежности СУС на период T_{OOC} в заданном физическом канале. Полученная оценка надежности СУС не превышает надежности физических каналов, составляющих СУС. Полученные результаты позволяют сделать выводы о

необходимости применения резервированной системы для организации взаимодействия пространственно разнесенных узлов в условиях нестационарности физических каналов.

Библиографические ссылки

1. *Климов И. З.* Принципы построения эффективной системы передачи информации в декаметровом диапазоне радиоволн : монография. Ижевск : Издательство ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. 268 с.

2. *Eric E. Johnson* Wideband ALE - the next generation of HF // Presented at the 2016 Nordic HF Radio Conference HF '16, August 2016.

3. *Патронов Д. Ю., Плыгунов О. В., Сергеев Д. Д.* Результаты сравнительных испытаний и экспериментальной оценки современных средств коротковолновой связи. // Техника радиосвязи. 2016. № 1. С. 9–17.

4. *Макаренко С. И.* Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18–68.

5. *Макаренко С. И.* Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 45–98.

6. *Макаренко С. И., Квасов М. Н.* Модифицированный алгоритм Беллмана – Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 13. С. 264–274.

7. *Меркушев О. В., Климов И. З.* Моделирование процесса установления соединения узлами радиосети передачи данных в ненадежных каналах связи // Доклады 15-й Международной конференции DSPA-2013, Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение (выпуск XV-1/2) / Российское научно-техническое общество радиотехники, электротехники и связи имени А. С. Попова. М., 2013. Т. 1. С. 166–169.

8. *Комарович В. Ф., Сосунов В. Н.* Случайные радиопомехи и надежность ДКМ-связи. М. : Связь, 1977. 136 с.

9. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М. : Юстиция, 2018. 480 с.

10. Создание модели инфокоммуникационной сети на базе OMNet++ / А. Ю. Шаимов, Д. Ю. Полин, А. А. Богданов, М. М. Марков, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 4. С. 141–150.

11. *Фадеев А. Н.* Реализация протоколов маршрутизации беспроводных самоорганизующихся сетей в OMNet++ // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики – 2015. 2015, № 1. С. 295–298.

12. *Johnson E. E.* Staring Link Establishment for High-Frequency Radio // Proceedings of MILCOM 2015, IEEE.

13. Когнитивная система связи и влияние и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхзюполосных декаметровых радиолоний / Ю. Л. Николашин, В. И. Мирошников, П. А. Будко, Г. А. Жуков // Морская радиоэлектроника. 2015. № 2. С. 16–22.

14. *Vanninen T.* Cognitive HF – New Perspectives to Use the High Frequency Band // Proceedings of CROWNCOM 2014.

15. *Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А.* Совместное использование методов повышения помехоустойчивости декаметровых радиолоний // Радиотехника, электроника и связь (РЭИС-2017). 2017. С. 76–85.

16. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

17. *Макаренко С. И., Рюмишин К. Ю., Михайлов Р. Л.* Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139–147.

References

1. *Klimov I.Z.* *Principy postroenija jeffektivnoj sistemy peredachi informacii v dekametrovom diapazone radiovoln* [Principles of building an effective information transmission system in the decameter range of radio waves]. Izhevsk, Izdatel'stvo IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova Publ., 2017. 268 p. (in Russ.).

2. *Eric E. Johnson* *Wideband ALE - the next generation of HF* // Presented at the 2016 Nordic HF Radio Conference HF '16, August 2016.

3. *Patronov D.Ju., Plygunov O.V., Sergeev D.D.* [The results of comparative tests and expert judgement of the advanced HF radio means]. *Tehnika radiosvjazi*. 2016. No. 1, pp. 9-17 (in Russ.).

4. *Makarenko S.I.* [Prospects and problems of development of communication networks of special purpose]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2017. No. 2, pp. 18-68 (in Russ.).

5. *Makarenko S.I.* [Convergence Time of IGP Routing Protocol] *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2015. №2. pp. 45-98. (in Russ.).

6. *Makarenko S.I., Kvasov M.N.* [Modified Bellman-Ford algorithm with forming the shortest and fallback paths and its application for telecommunication network stability improvement]. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2016. Vol. 14. No. 13. Pp. 264-274 (in Russ.).

7. *Merkushev O.V., Klimov I.Z.* [Determining the rules of access to the medium of the HF radio network at the stage of establishing a connection]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2009, no. 2, pp. 107-109 (in Russ.).

8. *Komarovich V.F., Sosunov V.N.* *Sluchajnye radiopomehi i nadezhnost' DKM svyazi* [Random interference and reliability HF communication]. Moscow, Svjaz' Publ., 1977, 136 p.

9. *Ventcel' E.S., Ovcharov L.A.* *Teorija sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozhenija* [Theory of

random processes and its engineering applications]. Moscow, Justicija Publ., 2018, 480 p. (in Russ.).

10. Shaimov A.Ju., Polin D.Ju., Bogdanov A.A., Markov M.M., Kopysov A.N., Hvorenkov V.V. [Creation of Infocommunication Network Model Based on OMNet++]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018. Vol. 21, no. 4, pp. 141-150 (in Russ.).

11. Fadeev A.N. *Realizacija protokolov marshrutizacii besprovodnyh samoorganizujushhihsja setej v OMNet++* [Implementation of mobile AD-HOC routing protocols in OMNET++]. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tehničeskogo universiteta svjazi i informatiki 2015* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics - 2015]. 2015, no. 1, pp. 295-298. (in Russ.).

12. Johnson E.E. Staring Link Establishment for High-Frequency Radio. Proceedings of MILCOM 2015, IEEE.

13. Nikolashin Ju.L., Miroshnikov V.I., Budko P.A., Zhukov G.A. [Cognitive connection system and

influence of monitoring data usage on noise immunity of ultra-narrow decameter]. *Morskaja radiojelektronika*. 2015, no. 2, pp. 16-22 (in Russ.).

14. Vanninen T. Cognitive HF - New Perspectives to Use the High Frequency Band. Proceedings of CROWNCOM 2014.

15. Nikolashin Ju.L., Budko P.A., Zhukov G.A. Sovmestnoe ispol'zovanie metodov povyshenija pomehoustojchivosti dekametrovyh radiolinij [Joint using of the methods to increase noise immunity of the decametric radio lines]. *Radiotekhnika, jelektronika i svjaz'* (RJeIS-2017). 2017, pp. 76-85 (in Russ.).

16. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. S.Peterburg, BHV-Peterburg Publ., 2006. 704 p.

17. Makarenko S.I., Rjumshin K.Ju., Mihajlov R.L. *Model' funkcionirovanija ob#ekta seti svjazi v uslovijah ogranichennoj nadezhnosti kanalov svjazi* [Model of functioning of telecommunication object in the limited reliability of communication channel conditions]. *Informacionnye sistemy i tehnologii*. 2014, no 6 (86), pp. 139-147 (in Russ.).

The Model of Connection Establishment Environment in a Distributed System with Unreliable Physical Channels

O. V. Merkushev, Applicant, Kalashnikov ISTU

I. Z. Klimov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

The paper presents the method of predicted assessment of the reliability of physical channels and the model of reliability of the connection establishment environment in a distributed data transmission system using the example of a radio communication system in the HF range. Due to the nature of signal propagation, fluctuations in the parameters of the transmitting medium, natural and artificial phenomena, the presence of "silence zones", and the difficult interfering environment of a communication system in the HF range, they are characterized by unsteady physical channels and the complexity of information exchange. With the interaction of nodes of the type "each with each", a distributed data transmission system with a dynamic multi-pole topology is formed. Delivery of messages to remote sites is performed by means of routing along the main and backup routes. Therefore, the issues of developing methods for generating message delivery routes based on reliability criteria are relevant, including: collecting and processing statistical data on the quality of received signals, determining patterns of changes in interference levels and periods of their influence, predicting the state of physical channels and adaptive management of their use, forming lines communications as data exchange systems with reliability exceeding the reliability of physical channels.

To solve the problem of forming communication lines, a method for assessing the reliability of physical channels under the conditions of their non-stationarity has been determined. In accordance with the accepted methods of access to the physical environment at the stage of establishing a connection, a method for predicting the assessment of the reliability of physical channels for a given period of interaction between neighboring nodes has been determined. In accordance with the accepted model of control of physical channels, a method has been developed for assessing the reliability of the environment for establishing the connection of neighboring nodes.

Keywords: channel, reliability, model, physical environment, forecasting, modeling, node.

Получено: 15.04.19